

秋台风“梅花”造成浙江极端降水成因分析

钱卓蕾¹, 沈哲文¹, 左骏²

(1. 绍兴市气象台, 浙江 绍兴 312000; 2. 绍兴市气象防灾减灾中心, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 利用全球降水观测计划卫星降水率产品、地面加密自动站和ERA5再分析资料, 对202212号台风“梅花”造成浙江极端降水的成因进行分析。结果表明: 台风“梅花”造成的极端降水主要分布在沿海和四明山区, 极值在四明山区, 9月12—13日强降水由台风北侧外围雨带造成, 14日则主要为台风本体降水; 高层西南风急流的稳定以及台风“梅花”在移动过程中与西风槽结合有利于维持台风强度并引起台风动力结构不对称; 台风“梅花”与副热带高压间的东风是台风发展的主要水汽来源, 西太平洋上热带气旋的存在也有利于台风“梅花”北侧水汽输送加强, 导致台风强降雨带偏北; 台风“梅花”北侧高层始终有位涡下传至对流层中低层, 促使低层扰动中心的发展, 冷空气侵入造成浙江东部中尺度斜压锋生; 受四明山地形影响, 台风“梅花”环流西北侧的偏北风进入内陆后形成中尺度辐合线, 山前抬升, 山后下沉, 有利于山前降水增幅。

关键词: 极端降水; 外围雨带; 等熵位涡; 锋生; 地形

中图分类号: P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)02-0104-13

0 引言

台风暴雨过程的分析和预报一直是天气预报业务关注的重点^[1]。许多学者从大尺度环流背景、中尺度系统、下垫面状况等多个方面对台风降水的发生、发展机制进行了探讨^[2-5]。台风与中纬度天气系统的相互作用是影响台风结构变化和台风暴雨的重要因素。郑怡等^[6]的研究表明, 弱冷空气与台风倒槽的相互作用对台风强降水的产生和维持起到了重要作用; 雷小途等^[7]认为西风槽强度变化可使得热带气旋降水突然增幅。出现在秋季的台风, 由于西风槽已经比较活跃, 台风的水汽输送与中纬度低槽有利的动力和热力条件相结合, 容易在台风外围产生暴雨, 造成台风暴雨非对称分布^[8-12]。陈联寿等^[13]指出, 当台风遇到冷空气时, 热力结构变得不对称, 斜压性增强, 台风外围锋区加强; 冷空气使得暴雨区上空的大气不稳定性增强, 容易触发边界层能量锋区附近的中尺度对流系统, 使

暴雨区上空的垂直运动更旺盛, 进而产生极端降水天气^[14-19]。除此之外, 地形也是导致台风暴雨非对称分布的重要原因之一。热带气旋在登陆前后, 由于地形辐合抬升作用、海陆下垫面摩擦变化等因素影响, 会使台风的动力和热力结构发生复杂变化^[20-23]。风场在有利地形条件下形成的中尺度辐合线, 能激发中尺度对流云团发生发展^[24], 除地形抬升作用外, 山地地形起伏还能使台风环流滞留在原地, 造成持续的暴雨过程^[25]。段晶晶等^[26]研究发现浙江东北部地形的摩擦辐合及抬升作用使得大量的对流云团汇集在台风西北侧, 对流系统活跃, 是台风“灿鸿”在该地区产生强降水的重要原因。

台风“梅花”发生在2022年9月, 在移动过程中受到副热带高压(简称副高)和西风槽的共同影响, 是典型的秋台风, 登陆时强度大, 暴雨范围集中, 降水极值受地形影响显著, 模式对于台风“梅花”造成的极端降水估计仍不足。本文通过对台风“梅花”在浙江登陆前后强降雨带的分布特征及成因进行

收稿日期: 2023-01-16。

基金项目: 浙江省气象局重点项目(2021ZD28); 浙江省气象局预报员专项(2021YBY10)。

作者简介: 钱卓蕾(1985-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事天气预报和气候研究工作。E-mail: 1033404758@qq.com

分析,以期台风极端降水预报提供参考。

1 资料和方法

本文所用资料包括:①浙江省自动气象站和国家站逐小时观测资料,包括风向、风速和降水等;②欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的第五代全球再分析数据(ERA5),空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为1 h;③融合主要温室气体探测仪(Greenhouse-gases Monitoring Instrument, GMI)、多卫星辐射和红外光谱仪(Infrared Radiation, IR)的全球降水观测计划(Global Precipitation Measurement, GPM)格点降水产品 GPM_3IMERGM,水平分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间分辨率为30 min。

利用锋生函数对台风降水过程中的锋生情况进行诊断,以假相当位温(θ_e)计算锋生函数 F ,降雨过程不考虑非绝热变化。锋生函数 F 可分解为3项^[27]: $F1$ (垂直运动倾斜项), $F2$ (水平辐散项), $F3$ (水平变形项,分为切变变形项和伸缩变形项)。 $F > 0$ 表示锋生, $F < 0$ 表示锋消。计算公式为:

$$F = \frac{d}{dt} |\nabla \theta_e| = \frac{1}{|\nabla \theta_e|} \cdot$$

$$\left[\left(\frac{\partial \theta_e}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \theta_e}{\partial x} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} (D) \right] -$$

$$\frac{1}{|\nabla \theta_e|} \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \left(\frac{\partial \theta_e}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) +$$

$$\frac{1}{|\nabla \theta_e|} \left[\frac{\partial \theta_e}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{d\theta_e}{dt} \right) + \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{d\theta_e}{dt} \right) \right]$$

$$F = F1 + F2 + F3 \quad (2)$$

$$F1 = -\frac{1}{|\nabla \theta_e|} \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \left(\frac{\partial \theta_e}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$F2 = -\frac{1}{2} |\nabla \theta_e| \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$F3 = -\frac{1}{2 |\nabla \theta_e|} \left[E_{st} \left(\frac{\partial \theta_e}{\partial x} \right)^2 + 2E_{sh} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} - E_{st} \left(\frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right)^2 \right]$$

$$(5)$$

式中: u 、 v 代表水平风速, ω 代表垂直风速; D 为辐合

辐散; E_{sh} 、 E_{st} 为切变变形项。 D 、 E_{sh} 、 E_{st} 计算公式为:

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6)$$

$$E_{sh} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (7)$$

$$E_{st} = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8)$$

2 台风“梅花”概况

2022年第12号台风“梅花”于中秋节前夕(9月8日)生成,12日夜间进入东海,14日20时30分(北京时,下同)以强台风级在舟山普陀区沈家门登陆(风速42 m/s,中心最低气压960 hPa),然后穿过舟山本岛进入杭州湾,于15日00点30分在上海奉贤沿海再次登陆(台风级)(见图1a)。台风“梅花”对浙中北部地区造成严重风雨影响。台风“梅花”的主要特征为:外围云系宽广,风雨影响时间长;近岸强度强,为1949年以来登陆舟山的最强台风;暴雨集中、强度强。台风“梅花”的强降雨主要集中在宁波、舟山和绍兴东部等地(见图1b),累计雨量超过200 mm,其中四明山区超过400 mm,单站最大雨量为余姚市大岚镇夏家岭的707 mm。台风“梅花”对浙江造成的强降雨主要集中在12—14日,图1c为该时段内台风中心气压和风力的演变图,台风进入东海之后,强度稳定,直到14日白天台风强度明显增强,登陆后又迅速减弱。

3 台风“梅花”极端降水分布特征

台风“梅花”影响浙江的主要时间为9月12—14日。从日降水量分布图来看(见图2),12日降水中心在浙江东部,中心值达到60 mm以上,降水相对较弱;13日起降水增强,雨量中心在四明山地区,中心雨量超过100 mm;14日极端降水范围扩大,100 mm以上的雨量中心出现在沿海地区和四明山区。从台风中心位置与台风雨带分布情况来看(见图3a),12日台风中心在台湾岛以东,而北侧的雨带一直扩展至 35°N 附近,浙江主要受该北侧外围雨带影响;13日台风“梅花”已进入东海南部海域,台风中心雨强减弱,而台风北侧外围仍维持大范围降水

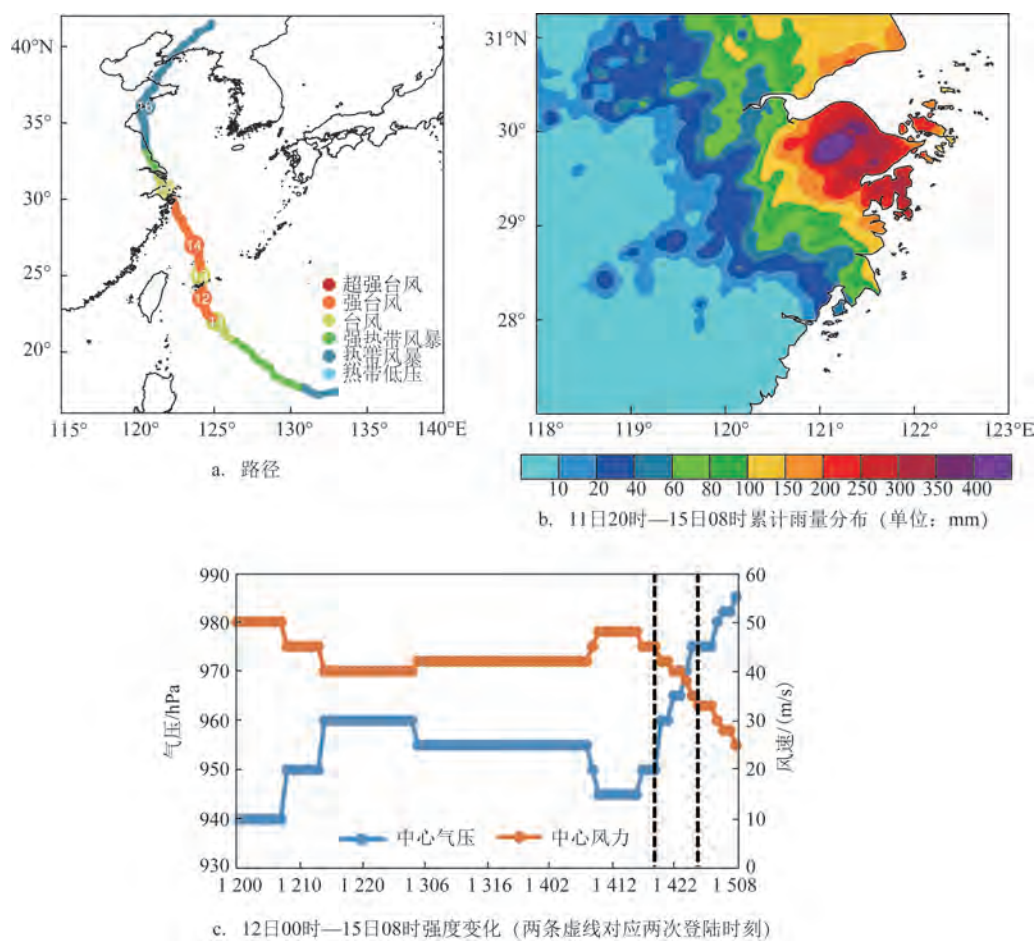


图1 台风“梅花”的路径、雨量及强度

Fig.1 Path, rainfall and intensity of Typhoon "MUIFA"

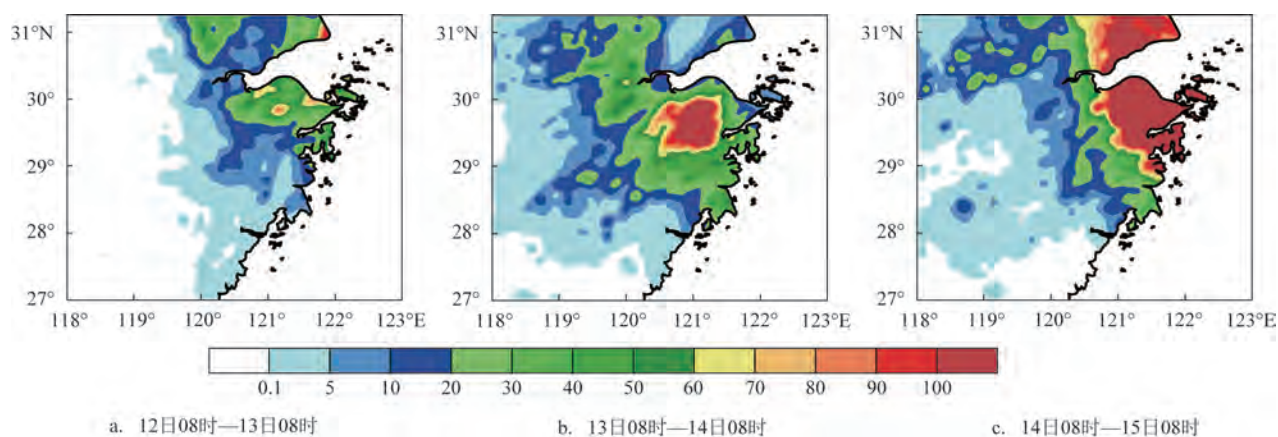
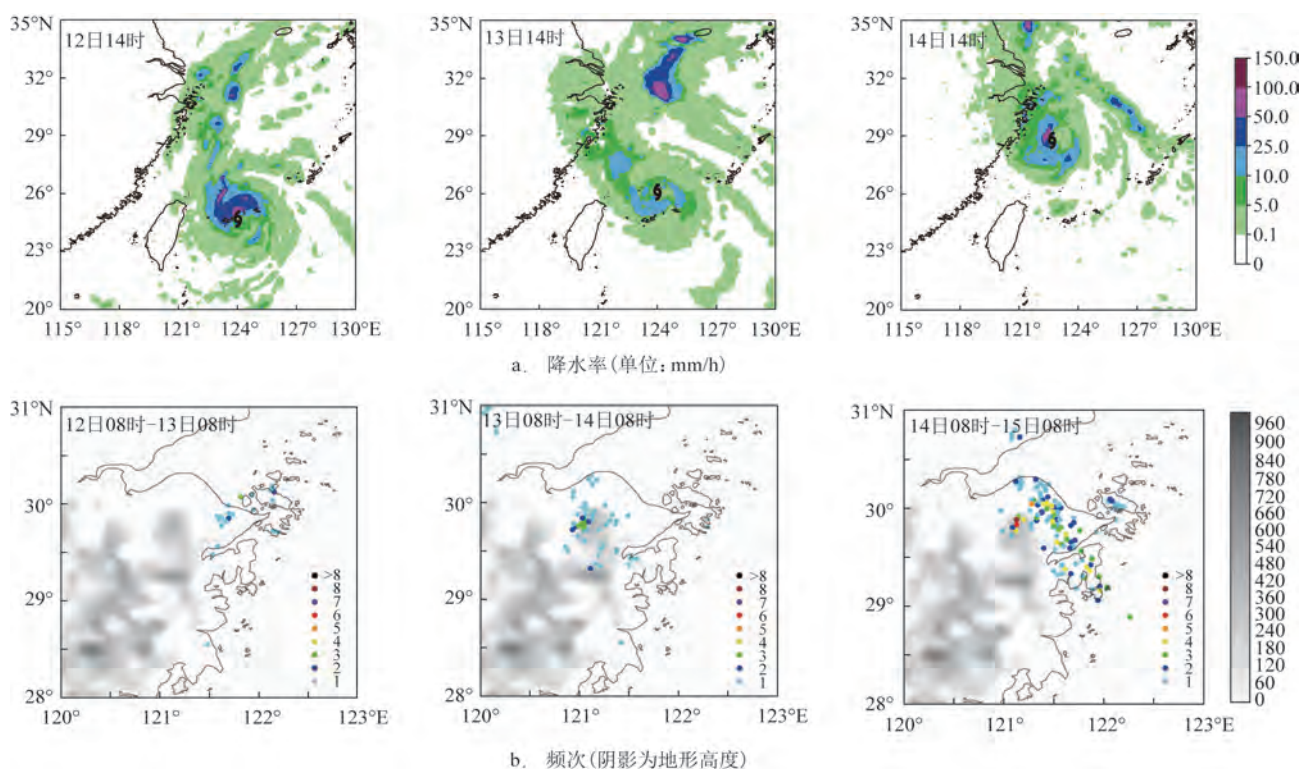


图2 24 h 累计雨量分布(单位:mm)

Fig.2 Cumulative rainfall distribution for 24 hours (unit:mm)

带;14日台风中心已在浙江沿海且台风在20时左右登陆,因此浙江降水主要为台风本体影响造成的降

水。分析降水超过 30 mm/h 的频次分布可以发现(见图 3b),12 日降水效率较高的站点主要分布在舟

图3 GPM融合格点降水率和降水 ≥ 30 mm/h的频次分布Fig.3 GPM_3IMERGM precipitation rate and frequency distribution of precipitation ≥ 30 mm/h

山和宁波东部;13日降水效率高值区从沿海移动至内陆四明山区;14日降水效率高值点较密集,主要分布在宁波和四明山区,频次大于5的点出现在四明山区。因此可以看出,台风“梅花”极端降水前期主要受远距离外围雨带和地形影响,后期则受台风本体环流和地形影响。

4 极端降水成因分析

4.1 大尺度环流场

分析200 hPa风场和散度场可以发现(见图4),12—14日,115°E附近的对流层高层始终有深槽稳定维持,台风“梅花”西北侧靠近深槽槽前西南风急流,急流造成台风中心以北一直到中纬度地区均有强辐散,而台风中心南侧距离急流较远,辐散明显减弱。高层深槽和西南风急流的稳定有利于台风发展以及台风结构出现明显不对称。在500 hPa上,12日14时(见图5a),台风“梅花”的中心位于(24.7°N,124°E),西太平洋副高北抬至(35°N,120°E)以东的日本地区,台风“梅花”中心在台湾东部,台风

与副高之间形成强东风急流。此时太平洋上还有另一个热带气旋存在,它加强了台风北侧的东风急流。此外北侧的西风槽槽底在27°N附近,已与台风“梅花”西北侧环流结合,在低层850 hPa风场上北风侵入台风环流北部。台风北侧受到冷空气和偏东风急流的影响,外围雨带十分宽广(见图3a)。13日14时(见图5b),台风“梅花”中心已北抬至(26.1°N,124°E),此时台风已与西风槽完全结合,台风中心南部风力减弱,而北侧受东风急流和冷空气的影响,强风速继续维持,因此台风强度较12日略有减弱但减弱幅度不大。14日14时(见图5c),台风“梅花”已进入浙江近海,中心位于(28.8°N,122.7°E),此时副高显著加强,台风南北两侧气压梯度均增大,中心附近风速增大,台风强度略增强。到了14日20时(见图5d),台风登陆,中心在(29.9°N,122.3°E),虽然受到地形摩擦的影响,但由于北侧冷空气和东风急流的影响仍然存在,台风强度减弱较慢,北侧雨带范围依然很广(图略)。此后,随着台风继续北上,东南风急流水汽通道被切断,台风逐渐减弱。

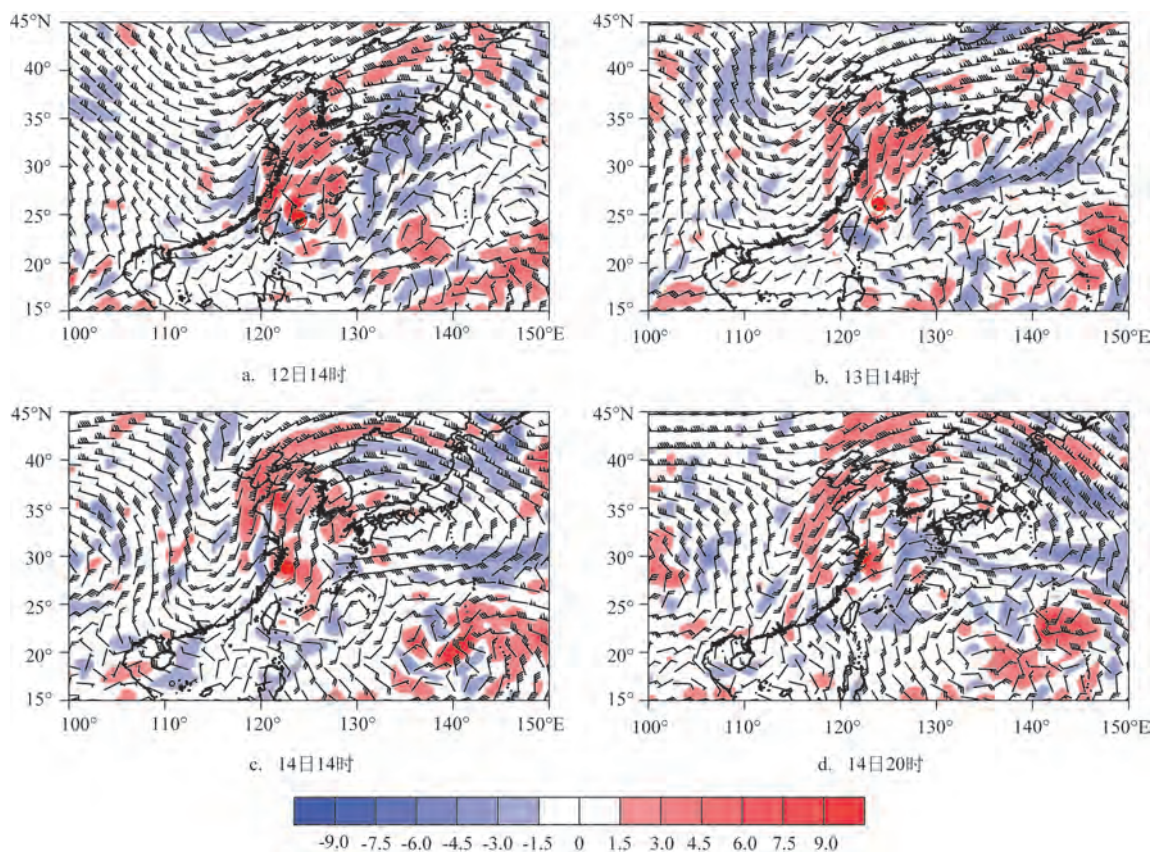


图4 200 hPa风场(风矢,单位:m/s)和散度场(填色,单位: m/s^2)(红色符号标记台风中心)

Fig.4 200 hPa wind (unit: m/s) and divergence field (unit: m/s^2) (Red symbols mark the centers of the typhoon)

4.2 水汽条件分析

从水汽通量及其散度场配合形势场来看,12日14时(见图5a、6a),台风“梅花”的水汽主要由台风北侧的偏东风急流提供,从水汽输送来看,台风“梅花”北侧的水汽通道与西太平洋上的热带气旋相连,因此热带气旋加强了台风的水汽输送。从水汽通量散度场上可以看到,水汽通量辐合区基本在台风中心以北,台风北侧外围的水汽通量辐合区呈带状自浙江南部一直延伸至 35°N 附近,而台风中心南侧为辐散区,因此降水极大值在台风中心以北(见图3a),且北侧外围雨带范围异常宽广。13日14时(见图5b、6b),台风“梅花”逐渐北上后与副高距离更近,气压梯度增大,北侧偏东风急流加强,水汽通量辐合区仍然偏向台风中心以北,水汽通量辐合带范围更广,从我国东部一直扩展到黄海和渤海地区。14日14时(见图5c、6c),台风“梅花”中心进入浙江近海,台风与西太平洋上的热带气旋逐渐远

离,两者之间的联系明显减弱,但受北侧副高的影响,台风北侧仍有较强的水汽输送,浙江东部在台风中心附近的水汽通量辐合区内,因此14日的浙江降水主要为台风本体降水。14日20时(见图5d、6d),水汽通量辐合中心仍偏向台风中心以北,主要的水汽通量辐合带自台风中心向北一直到 40°N 以北。因此,在台风移动过程中,台风中心和外围北侧始终维持强的辐合带,这是导致台风中心北侧维持宽广雨带的重要原因。

4.3 冷空气侵入与斜压锋生

从台风形势场分析可知,由于西风槽的存在,在台风移动过程中始终存在冷空气侵入,一般是从对流层中高层侵入到低层,而冷空气侵入区与等熵面上高位涡区有着较好的对应^[28]。寿绍文等^[29]利用湿位涡和等熵位涡理论对暴雨、大暴雨天气过程进行了分析,结果表明大值位涡区对应强降水区,正位涡异常中心对降水的发生发展具有很强的指示

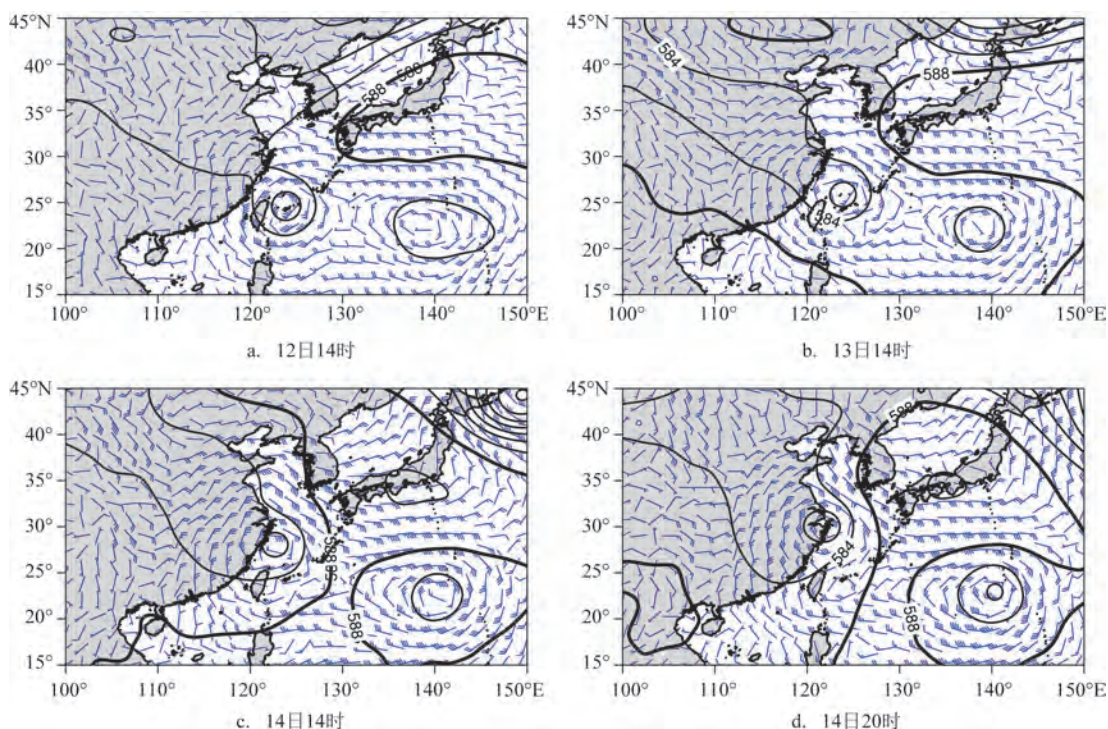


图5 500 hPa位势高度场(等值线,单位:gpm)和850 hPa风场(风矢,单位:m/s)

Fig.5 500 hPa geopotential height field (unit: gpm) and 850 hPa wind field (unit: m/s)

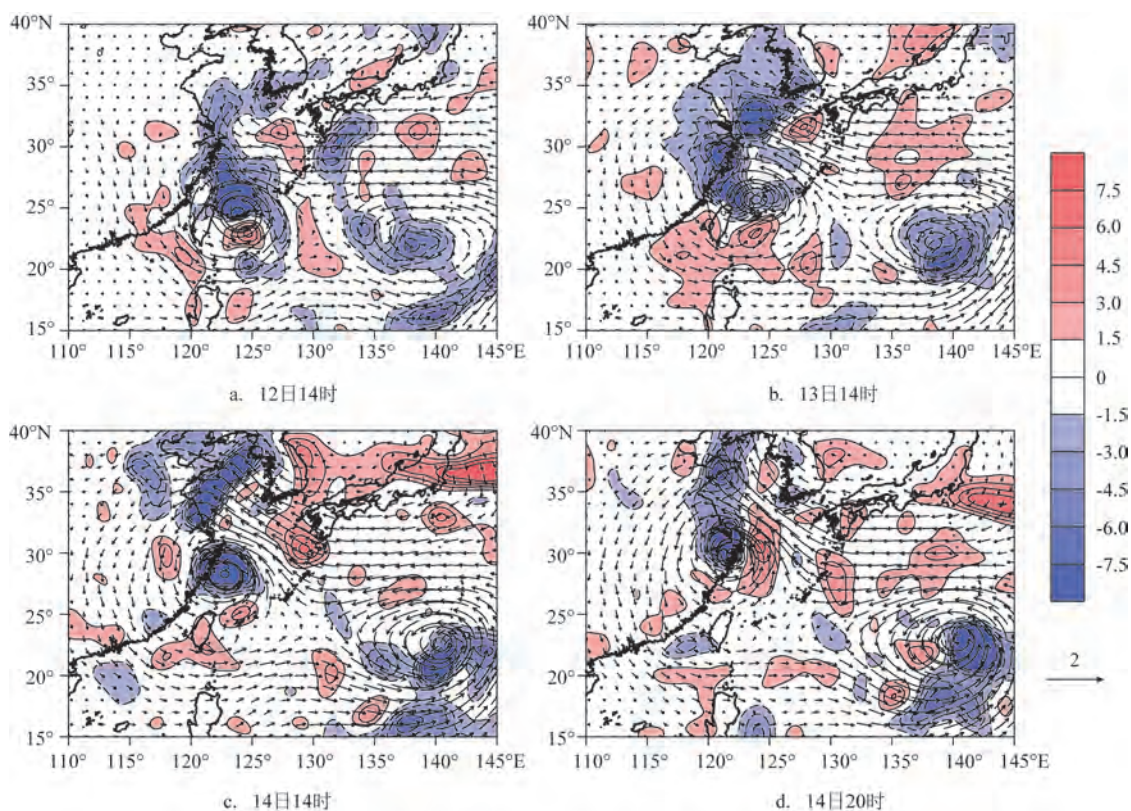


图6 整层水汽通量(矢量,单位: $\text{g}/(\text{s}\cdot\text{cm})$)和水汽通量散度(填色,单位: $\text{g}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$)

Fig.6 Water vapor flux (vector, unit: $\text{g}/(\text{s}\cdot\text{cm})$) and water vapor flux divergence (shading, unit: $\text{g}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$) across the entire layers

意义。

分析台风“梅花”中心北侧5个纬距处等熵位涡的纬向剖面可以发现,12日14时(见图7a),在 120°N 以西有大片高位涡区,代表西风槽的位置,0.6 PVU ($1\text{ PVU} = 10^{-6}\text{m}^2 \cdot \text{K}/(\text{s} \cdot \text{kg})$)的高位涡前沿伸至325 K附近,此外,在 $120^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$ 上空,350 K以上存在等值线密集的高位涡区,其下方有漏斗状位涡柱下传并分裂出小位涡扰动,风场上对应明显的下沉气流。因此当西风槽与冷空气结合后,冷空气的侵入加强了台风北侧的东北风,使得台风北侧扰动加强,有利于台风强度的维持。13日14时(见图7b), $120^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$ 上空漏斗状位涡柱分裂出的位涡扰动明显加强并继续下传至310 K,中心超过1.0 PVU,位涡扰动附近的下沉气流也加强,北侧侵入的冷空气加强,进一步导致台风北侧气旋性扰动的发展,台

风北侧外围降雨加强。14日14时(见图7c),台风登陆前, 120°E 附近有1.0 PVU的位涡中心传播至320 K附近,表明此时仍存在冷空气侵入,抵消了台风北侧云带进入陆地后地形摩擦削弱的影响,因此维持了台风“梅花”的强台风级别。14日20时(见图7d),台风登陆, 120°E 上空0.6 PVU的小扰动继续从高层下传,因此台风登陆后强度减弱慢,北侧雨带维持。以上分析表明,在台风“梅花”的近海移动过程中,冷空气的影响是不容忽视的,冷空气侵入有利于激发低层气旋性扰动发展,有利于台风强度维持,对台风北侧雨带的发展也有重要作用。

冷空气侵入可导致台风中心北侧斜压锋生^[14-15],从锋生函数的水平分布来看,12日14时(见图8a),北侧冷空气侵入后与台风环流中的暖湿气流相遇,形成一条北偏东—南偏西方向的中尺度锋

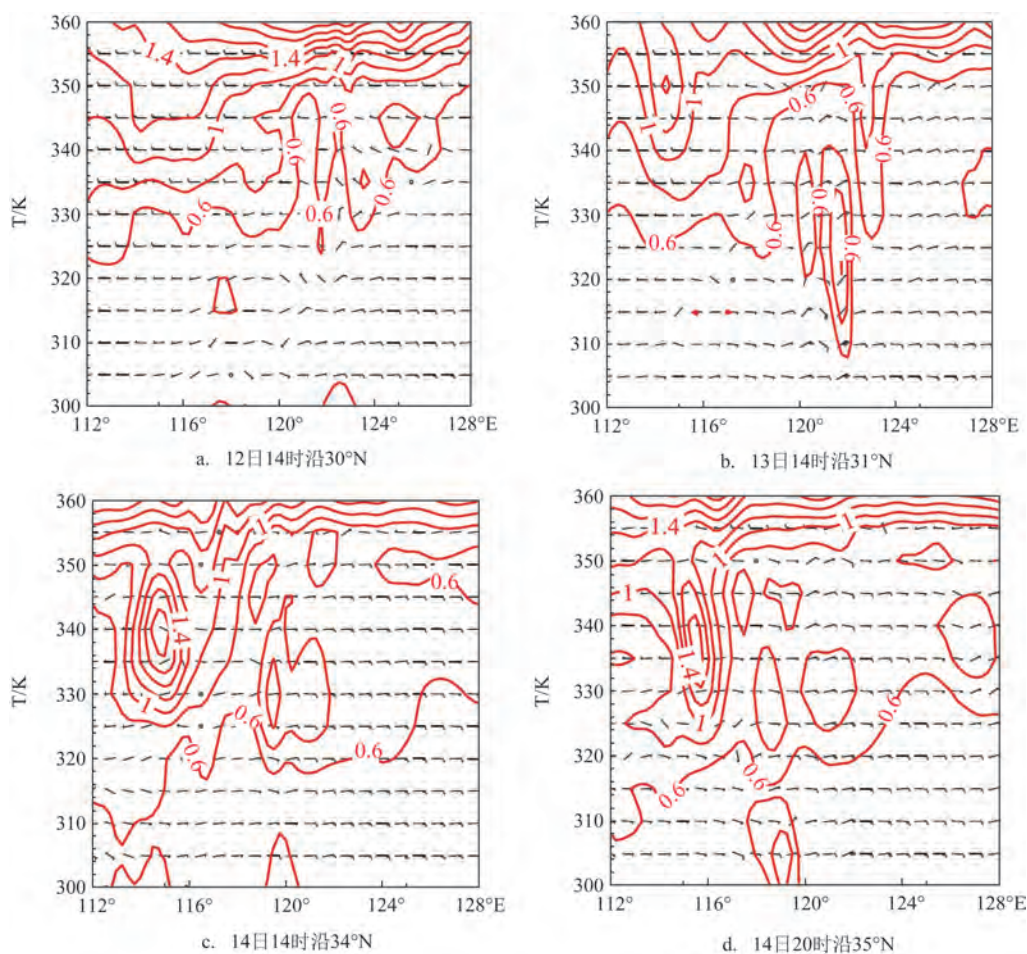


图7 台风“梅花”中心北侧5个纬距处等熵面上位涡(等值线,单位:PVU)和风场(风矢,单位:m/s)的垂直剖面

Fig.7 The vertical section of vortex potential (contours and coloring, unit: PVU) and wind field (wind vector, unit: m/s) on the isentropic surface at 5 latitude distances north of the center of Typhoon "MUIFA"

区,中尺度锋区从浙江东部经过上海一直向北延伸至江苏南部沿海,与台风外围北侧雨带走向基本一致;13日14时(见图8b),浙江东部到近海的中尺度锋区仍然存在并略偏南,其中四明山南部有一个锋生中心,可能与冷空气侵入后遇到山区地形的阻挡有关,在山区附近斜压性加强导致锋生;14日14时(见图8c),台风逼近浙江沿海,形成南北两支中尺度锋区,北支锋区位于 32°N 以北,为台风外围环流与冷空气交汇而形成,南支锋区位于 30°N 以南的四明山区—浙江东南部沿海,此时台风中心已到达 29°N 附近,冷空气可直接侵入到中心北侧,遇地形阻挡后,在四明山区附近形成锋生;14日20时(见图8d)仍有南北两支锋区存在,北支锋区在 30°N 以北,

强度较弱,南支锋区在浙江东部沿海。

4.4 台风“梅花”动力不对称结构

台风“梅花”在移动过程中靠近高层西南风急流,辐散中心偏北,同时受冷空气侵入锋生和北侧东风急流的影响,台风结构出现明显不对称,而台风“梅花”雨带偏北与其动力结构的不对称性有密切联系。从经过台风中心的风场和散度场经向垂直剖面图可知,12日14时(见图9a),台风中心在 24.7°N , 124°E ,近地面 $23^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 均为较强的辐合区,但在850 hPa以上,只在 25°N 以北为显著辐合区,500~100 hPa附近为辐散区,中心在200~150 hPa之间,高层强辐散区向北延伸至 31°N 以北,辐散抽吸

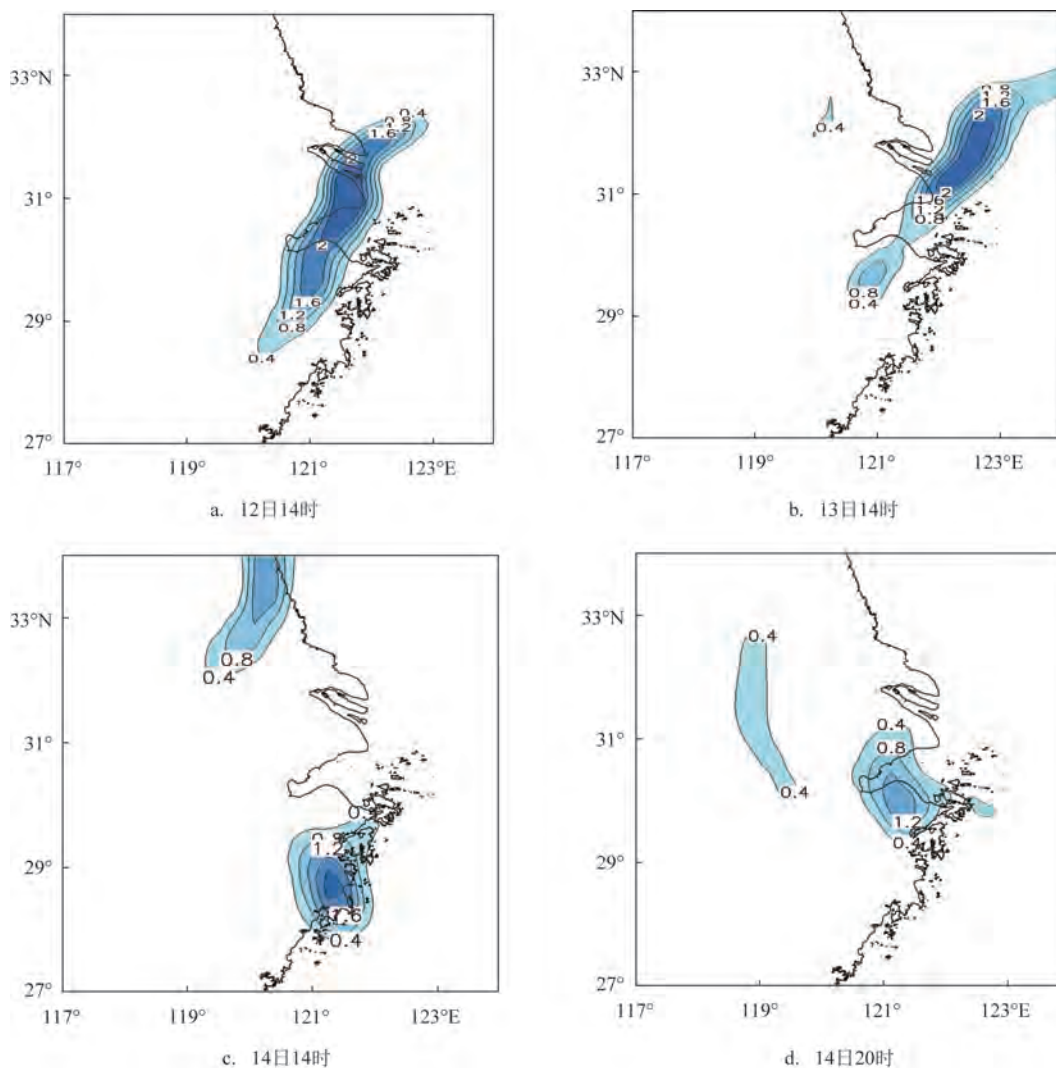


图8 700 hPa锋生函数分布

Fig.8 Distribution of horizontal frontogenesis function over 700 hPa

作用使得低层辐合也出现北倾的趋势,这种辐合辐散的不均匀分布导致台风中心以北上升运动强烈发展至150 hPa,台风中心以南上升运动迅速减弱。此外,在31°N以北,600 hPa以下均为北风,冷暖气流辐合抬升,在29°~31°N之间形成另一个上升运动中心,对应台风外围雨带所在位置。13日14时(见图9b),台风中心北移至26.1°N,124°E,此时的辐合辐散中心完全偏离台风中心,距离台风中心3个纬距以北,29°~31°N上空700 hPa以下为强辐

合,以上为强辐散,上升运动发展至200 hPa,因此此时台风动力结构极不对称,最强上升运动出现在29°~30°N附近。14日14时(见图9c),台风登陆前中心在28.8°N,122.7°E,近地面27°~31°N为强辐合区,700 hPa以上转为辐散,28°N以北为强的上升运动,上升运动高度发展至200 hPa,以南有弱的下沉运动,此时31°N以北500 hPa以下仍有持续北风影响。14日20时(见图9d),台风登陆,中心移动至29.9°N,122.3°E,中心附近的辐合辐散分布类似14

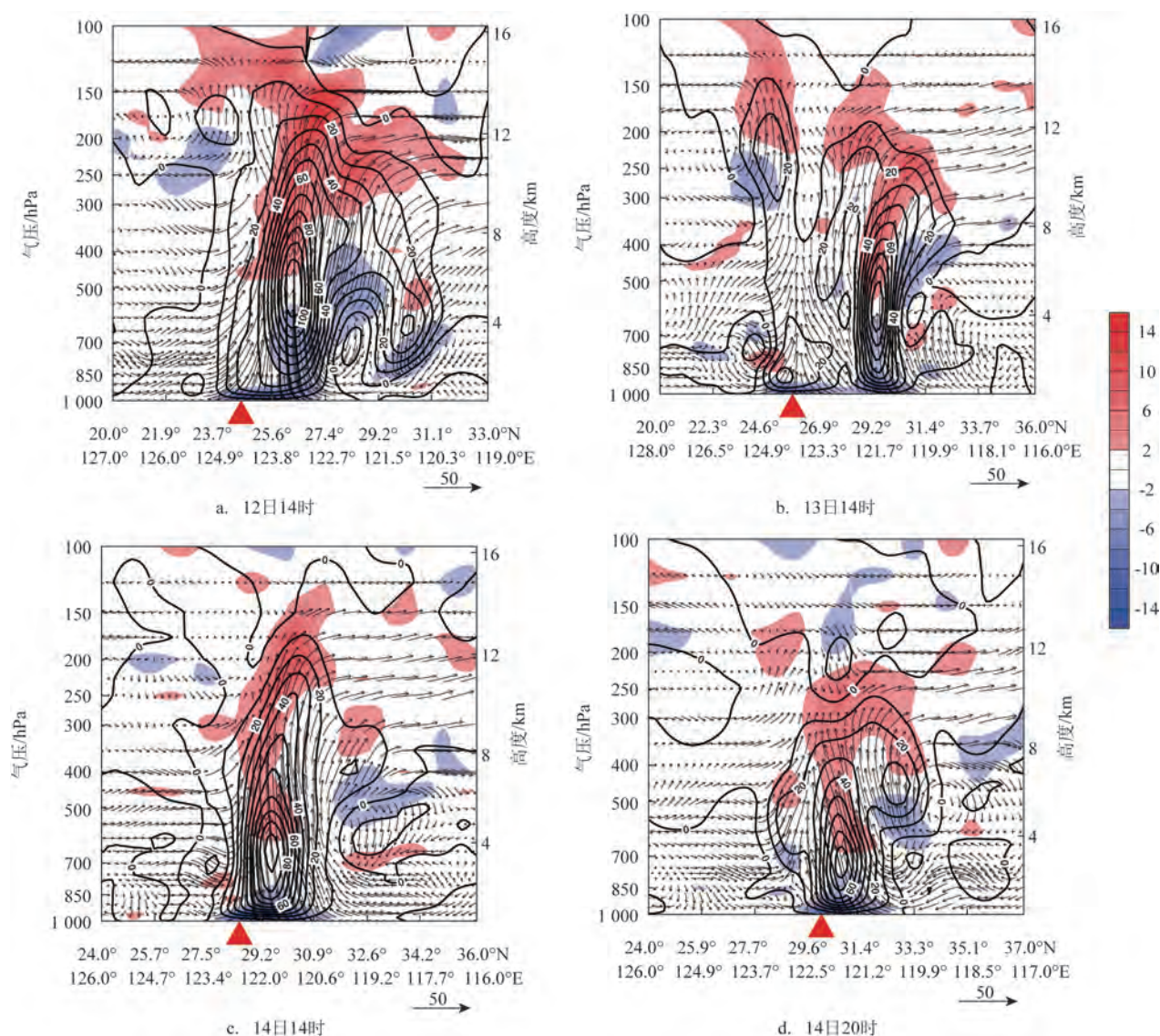


图9 沿台风中心风场(矢量,单位:m/s)、垂直速度(等值线,单位:m/s)和散度场(填色,单位:s⁻¹)的垂直剖面(红色三角形指示台风中心)

Fig.9 The vertical section of the wind field (vector, unit: m/s), vertical velocity (contour, unit: m/s), and divergence field (filled area, unit: s⁻¹) along the center of the typhoon (red triangle indicates typhoon center)

时,但最强上升运动高度降低至 300 hPa。因此,在台风“梅花”近海移动发展过程中,上升运动始终为自北向南减弱,台风强动力结构偏向中心以北。

4.5 中尺度地形对极端降水的作用

从图 2 和图 3 可知,总雨量以及 13—14 日的降水极大值出现在四明山区,降水效率最高频次站点也分布在四明山区,且基本分布在四明山的北侧,因此中尺度地形对于此次台风降水有明显的增幅

作用。

从 13 日 14 时和 14 日 14 时的自动站风场和地形图可知(见图 10),13 日浙江已经受北风控制(见图 10a),北风向南推进至四明山区时,由于四明山的形状为东西走向,受山区地形阻挡,北风在山后转为西北风,且山前风速大、山后风速小,因而在四明山区北侧形成北风中尺度辐合线,有利于中尺度上升运动发展。从风场经向垂直剖面图可知,13 日 14 时(见图 11a),山前一山顶附近辐合中心达到

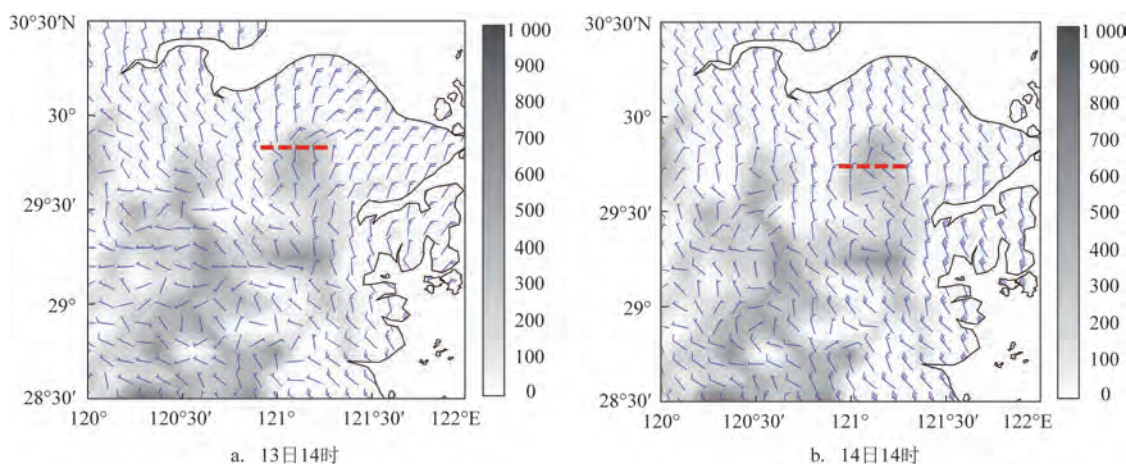


图 10 自动站风场(风矢,单位:m/s)和海拔(填色,单位:m)分布

Fig.10 Distribution of wind field (barb, unit: m/s) and altitude (shading, unit: m) at automatic stations

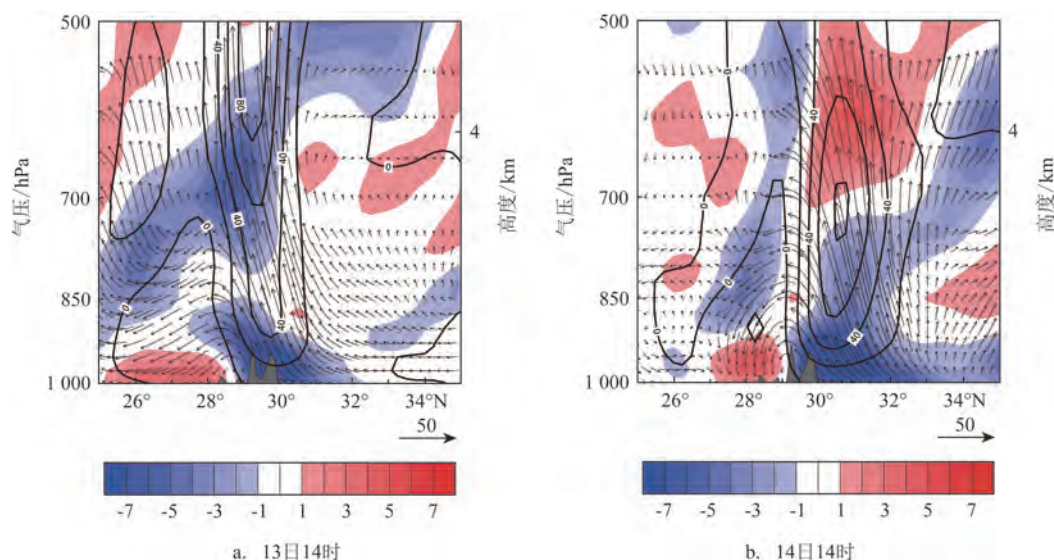


图 11 风场(矢量,单位:m/s)、垂直速度(等值线,单位:m/s)和散度场(填色,单位: $10^{-5}/s$)沿 $121^{\circ}E$ 经向垂直剖面(黑色阴影为地形)

Fig.11 The meridional vertical section along $121^{\circ}E$ of the wind field (vector, unit: m/s), vertical velocity (contour, unit: m/s), and divergence field (filled area, unit: $10^{-5}/s$) (the black shadow is the terrain)

$-8 \times 10^{-5}/s$, 辐合区高度扩展至 850 hPa, 山后近地面为辐散区, 850 hPa 上为辐合区, 因此山前有强上升运动, 而山后有弱的下沉运动。14 日 14 时(见图 10b), 近地面风场上四明山附近东西走向的中尺度辐合线维持, 垂直剖面图上的山前辐合中心从地面一直延伸到 700 hPa 附近(见图 11b), 中心值为 $-9 \times 10^{-5}/s$, 而 700 hPa 以上为辐散中心, 山前的上升运动较 13 日 14 时更强, 山后 925 hPa 以下为辐散区, 以上为辐合区, 山后仍有下沉运动。因此台风气流过山时, 山前气流抬升, 山后下沉, 降水极值点位于山前。

5 结 论

本文利用 GPM_3IMERGM 降水率资料、地面加密自动站和 ERA5 再分析资料, 从大尺度环流背景、水汽条件、动力热力结构、中尺度地形等方面分析了 2022 年 9 月台风“梅花”造成浙江极端降水的成因。主要结论如下:

①台风“梅花”造成的浙江强降水时段集中在 9 月 12—14 日, 其中 12—13 日由台风外围雨带造成, 14 日为台风本体降水, 过程降水中心分布在沿海和四明山区, 极大值在四明山区, 高降水效率点也集中在沿海和四明山区。

②台风“梅花”在移动过程中靠近高层槽前西南风急流, 导致台风中心北侧高层维持强的辐散区。台风“梅花”在 12 日已与中层西风槽结合, 移动过程中北侧始终有冷空气影响, 冷空气侵入对台风强度的维持有重要影响。台风“梅花”的主要水汽来源为西太平洋, 由台风北侧与副高之间的东风急流提供, 西太平洋上的热带气旋加强了北侧东风急流。水汽通量辐合中心始终偏向台风北侧, 台风辐合、辐散以及垂直运动中心也偏向北侧, 导致台风强降水主要分布在中心以北以及北侧外围。

③等熵位涡的变化可以指示冷空气侵入以及扰动的发展。台风登陆前后北侧高层始终有高位涡下传, 在中低层引起气旋性涡度发展, 同时, 冷空气侵入与台风暖湿气流之间造成明显的中尺度锋区, 12—13 日锋区位于浙江东部地区, 造成该地区出现强降水, 14 日锋区北抬至江苏等地, 因而 14 日浙江地区的强降水为台风本体环流造成。

④台风“梅花”在登陆前后, 浙江地区始终为偏北风控制, 偏北风进入内陆, 遇到东西向的四明山时, 形成北风中尺度辐合线, 山前气流抬升, 山后下沉, 造成山前出现降水极值点。

参考文献:

- [1] 许映龙, 张玲, 高拴柱. 我国台风预报业务的现状及思考[J]. 气象, 2010, 36(7): 43-49.
XU Y L, ZHANG L, GAO S Z. The advances and discussions on China operational typhoon forecasting[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(7): 43-49.
- [2] 王晓, 余晖, 鲍旭炜, 等. “菲特”(1323)台风降水的极端性分析[J]. 气象科学, 2017, 37(4): 514-521.
WANG X, YU H, BAO X W, et al. Analysis on extreme characteristics of the precipitation brought by typhoon “Fitow” (1323) [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2017, 37(4): 514-521.
- [3] 夏侯杰, 朱伟军, 任福民, 等. 南海夏季风对台风“启德”极端降水影响的数值模拟[J]. 气象科学, 2019, 39(3): 295-303.
XIA H J, ZHU W J, REN F M, et al. Numerical simulation on the influence of South China Sea summer monsoon on the extreme precipitation caused by typhoon “Kai-tak” [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, 39(3): 295-303.
- [4] 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 登陆热带气旋研究的进展[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 541-549.
CHEN L S, LUO Z X, LI Y. Research advances on tropical cyclone landfall process[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(5): 541-549.
- [5] REN F M, WANG Y M, WANG X L, et al. Estimating tropical cyclone precipitation from station observations[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2007, 24(4): 700-711.
- [6] 郑怡, 杨晓霞, 孙晶. 台风“温比亚”(1818)造成山东极端强降水的成因分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(1): 106-115.
ZHENG Y, YANG X X, SUN J. Causal analysis of extremely heavy precipitation in Shandong Province caused by Typhoon RUMBIA (2018) [J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(1): 106-115.
- [7] 雷小途, 陈联寿. 热带气旋的登陆及其与中纬度环流系统相互作用的研究[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 602-615.
LEI X T, CHEN L S. Tropical cyclone landfalling and its interaction with mid-latitude circulation systems[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 59(5): 602-615.
- [8] KNOX J L. The storm “Hazel”: synoptic resumé of its development as it approached Southern Ontario[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1955, 36(6): 239-246.
- [9] SEKIOKA M. A hypothesis on complex of tropical and extratropical cyclones for typhoon in the middle latitudes: I. Synoptic structure of typhoon Marie passing over the Japan Sea[J]. Journal

- of the Meteorological Society of Japan, 1956, 34(5): 276-287.
- [10] WANG Y Q, WANG Y Q, FUDEYASU H. The role of Typhoon Songda (2004) in producing distantly located heavy rainfall in Japan[J]. Monthly Weather Review, 2009, 137(11): 3699-3716.
- [11] SCHUMACHER R S, GALARNEAU T J JR, BOSART L F. Distant effects of a recurving tropical cyclone on Rainfall in a Midlatitude convective system: a high-impact predecessor rain event[J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(2): 650-667.
- [12] 李英, 陈联寿, 王继志. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征[J]. 气象学报, 2004, 62(2): 167-179.
- LI Y, CHEN L S, WANG J Z. The diagnostic analysis on the characteristics of large scale circulation corresponding to the sustaining and decaying of tropical cyclone after it's landfall[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(2): 167-179.
- [13] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- CHEN L S, DING Y H. Introduction to the typhoons over West Pacific[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [14] 刘会荣, 李崇银. 干侵入对济南“7.18”暴雨的作用[J]. 大气科学, 2010, 34(2): 374-386.
- LIU H R, LI C Y. Impacts of the dry intrusion on Jinan torrential rain occurring on 18 July 2007[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(2): 374-386.
- [15] 何立富, 许爱华, 陈涛. “泰利”台风低压大暴雨过程冷空气与地形的作用[J]. 气象科技, 2009, 37(4): 385-391.
- HE L F, XU A H, CHEN T. Cold air activities and topographic forcing in severe torrential rainfall in landing typhoon depression (Tailim)[J]. Meteorological Science and Technology, 2009, 37(4): 385-391.
- [16] 曹晓岗, 王慧, 漆梁波. 台风与冷空气对“13.10”上海特大暴雨过程的影响分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(4): 351-362.
- CAO X G, WANG H, QI L B. The combined effects of typhoon Fitow and Danas together with cool air on an excessive heavy rain from October 7 to 8 in 2013 in Shanghai[J]. Torrential Rain and Disasters, 2014, 33(4): 351-362.
- [17] 汤鹏宇, 何宏让, 阳向荣, 等. 北京“7·21”特大暴雨中的干侵入分析研究[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 210-219.
- TANG P Y, HE H R, YANG X R, et al. Research and analysis of dry intrusion during Beijing ‘7·21’ extreme torrential rain[J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(1): 210-219.
- [18] 吴志彦, 李宏江, 石燕清, 等. 山东半岛一次台风暴雨过程的冷空气侵入特征分析[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(1): 61-68.
- WU Z Y, LI H J, SHI Y Q, et al. Characteristic analysis of cold air intrusion during a typhoon-related torrential rain event in Shandong Peninsula[J]. Torrential Rain and Disasters, 2016, 35(1): 61-68.
- [19] 陈鹏, 庞玥, 张虹, 等. 台风与冷空气对重庆“9.17”大暴雨的影响分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(3): 227-234.
- CHEN P, PANG Y, ZHANG H, et al. The analysis of the “9.17” heavy rainfall in Chongqing under the influence of the typhoon and cold air[J]. Torrential Rain and Disasters, 2017, 36(3): 227-234.
- [20] 王瑾, 柯宗建, 江吉喜. “麦莎”台风暴雨落区非对称分布的诊断分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23(6): 563-568.
- WANG J, KE Z J, JIANG J X. A diagnostic analysis to the asymmetric distribution of typhoon rainfall area[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(6): 563-568.
- [21] 王勇, 丁治英, 李勋, 等. 台风“海棠”(2005)登陆前后非对称螺旋雨带特征分析[J]. 热带气象学报, 2010, 26(5): 544-554.
- WANG Y, DING Z Y, LI X, et al. Dynamic analysis of asymmetric spiral rain bands around the landing of Typhoon HAITANG (2005)[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2010, 26(5): 544-554.
- [22] 岳彩军, 曹钰. “海棠”台风(2005)降水非对称分布特征成因之大气因子研究[J]. 热带气象学报, 2014, 30(2): 219-228.
- YUE C J, CAO Y. Study on the genesis of asymmetrical distribution characteristics of precipitation associated with typhoon HAITANG (2005) from the viewpoint of atmospheric factor[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 30(2): 219-228.
- [23] 孙力, 董伟, 药明, 等. 1215号“布拉万”台风暴雨及降水非对称性分布的成因分析[J]. 气象学报, 2015, 73(1): 36-49.
- SUN L, DONG W, YAO M, et al. A diagnostic analysis of the causes of the torrential rain and precipitation asymmetric distribution of typhoon Bolaven (2012)[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(1): 36-49.
- [24] 冀春晓, 薛根元, 赵放, 等. 台风Rananim登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 233-244.
- JI C X, XUE G Y, ZHAO F, et al. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of typhoon Rananim During Landfall[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(2): 233-244.
- [25] CHEN L S, LUO Z X. A study of the effect of topography on the merging of vortices[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(1): 13-22.
- [26] 段晶晶, 钱燕珍, 周福, 等. 台风灿鸿造成浙江东北部大暴雨地形作用的数值模拟研究[J]. 气象, 2017, 43(6): 686-695.
- DUAN J J, QIAN Y Z, ZHOU F, et al. Numerical simulation of topographic effect on heavy rainfall in northeastern Zhejiang caused by typhoon Chan-Hom[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(6): 686-695.
- [27] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理与方法[M]. 4版. 北京: 气象出版社, 2007: 95-106.
- ZHU Q G, LIN J R, SHOU S W, et al. Synoptic principles and methods[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 95-106.
- [28] 李文娟, 俞小鼎, 滕代高, 等. 中国江南—华南地区一次强飑线天气过程位涡诊断分析[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(6): 1-10.

LI W J, YU X D, TENG D G, et al. Diagnostic analysis of potential vortex of a severe squall line weather process in South China[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2021, 37(6): 1-10.

[29] 寿绍文, 李耀辉, 范可. 暴雨中尺度气旋发展的等熵面位涡分析

[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 560-568.

SHOU S W, LI Y H, FAN K. Isentropic potential vorticity analysis of the mesoscale cyclone development in a heavy rain process[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 59(5): 560-568.

Analysis of extreme precipitation in Zhejiang Province caused by Typhoon "Muifa"

QIAN Zhuolei¹, SHEN Zhewen¹, ZUO Jun²

(1. Shaoxing Meteorological Office, Shaoxing 312000, China; 2. Shaoxing Meteorological Disaster Prevention and Mitigation Center, Shaoxing 312000, China)

Abstract: By using GPM satellite 3-IMERGM precipitation rate product, ground encryption automatic station and ERA5 reanalysis data, the causes of extreme precipitation in Zhejiang Province during Typhoon “Muifa” (202212) are analyzed. The results show that the extreme precipitation mainly locates in the coastal area and Siming Mountain area with extreme value in the Siming Mountain area. The heavy precipitation is caused by the north outer rain belt of the typhoon on September 12—13, but due to the typhoon body on September 14. The stability of the high-level southwesterly jet and the typhoon's combination with the westerly trough during its moving benefit for the maintain of the typhoon intensity and leads to the asymmetry of the typhoon dynamic structure. The easterly jet between the typhoon and the subtropical high is the main water vapor source for the typhoon's development. The existence of another tropical cyclone over the western Pacific is also conducive to strengthen the water vapor transport on the northern side of the typhoon, which leads to the heavy north rain belt of the typhoon. There are always potential vortex disturbances in the upper layer of the north side of the typhoon flowing down to the middle and lower troposphere, which promotes the development of disturbance center in the lower troposphere. Meanwhile, cold air invades and causes mesoscale baroclinic frontogenesis in eastern Zhejiang Province. Affected by the topography of Siming Mountain, the northerly winds on the northwest side of the typhoon enter the inland and form a mesoscale convergence line. The air flow rises in front of the mountain and sinks in the back of the mountain, which is conducive to the increase of precipitation.

Key words: extreme precipitation; outer rain belt; isentropic potential vortex; frontogenesis; terrain